

АЦП и ЦАП

Кристиян Стоименов

1 ноември 2023 г.

ТУЕС,
ПВМКС



1. Основните неща

2. ЦАП

3. АЦП

4. Литература

Основните неща

Бройни системи

Какво е бройна система?

Бройни системи

Какво е бройна система?

Пример

$$\begin{array}{ll} 14_{(10)} = 1 \cdot 10^1 + 4 \cdot 10^0 & \implies 14_{(10)} \\ 14_{(10)} = 1 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 0 \cdot 2^0 & \implies 1110_{(2)} \\ 14_{(10)} = 1 \cdot 3^2 + 1 \cdot 3^1 + 2 \cdot 3^0 & \implies 112_{(3)} \\ 14_{(10)} = 1 \cdot 8^1 + 6 \cdot 8^0 & \implies 16_{(8)} \\ 14_{(10)} = 14 \cdot 16^0 & \implies 14_{(16)} \equiv E_{(16)} \end{array}$$

Бройни системи

Какво е бройна система?

Пример

$$14_{(10)} = 1 \cdot 10^1 + 4 \cdot 10^0 \quad \Longrightarrow \quad 14_{(10)}$$

$$14_{(10)} = 1 \cdot 3^2 + 1 \cdot 3^1 + 2 \cdot 3^0 \quad \Longrightarrow \quad 112_{(3)}$$

$$14_{(10)} = 1 \cdot 8^1 + 6 \cdot 8^0 \quad \Longrightarrow \quad 16_{(8)}$$

$$14_{(10)} = 14 \cdot 16^0 \quad \Longrightarrow \quad 14_{(16)} \equiv E_{(16)}$$

Бройни системи

Какво е бройна система?

Пример

$$14_{(10)} = 1 \cdot 10^1 + 4 \cdot 10^0 \quad \Rightarrow \quad 14_{(10)}$$

$$14_{(10)} = 1 \cdot 8^1 + 6 \cdot 8^0 \quad \Rightarrow \quad 16_{(8)}$$

$$14_{(10)} = 14 \cdot 16^0 \quad \Rightarrow \quad 14_{(16)} \equiv E_{(16)}$$

Бройни системи

Какво е бройна система?

Пример

$$14_{(10)} = 1 \cdot 10^1 + 4 \cdot 10^0 \quad \Rightarrow \quad 14_{(10)}$$

$$14_{(10)} = 14 \cdot 16^0 \quad \Rightarrow \quad 14_{(16)} \equiv E_{(16)}$$

Бройни системи

Какво е бройна система?

Пример

$$\begin{array}{ll} 14_{(10)} = 1 \cdot 10^1 + 4 \cdot 10^0 & \Rightarrow 14_{(10)} \\ 14_{(10)} = 1 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 0 \cdot 2^0 & \Rightarrow 1110_{(2)} \\ 14_{(10)} = 1 \cdot 3^2 + 1 \cdot 3^1 + 2 \cdot 3^0 & \Rightarrow 112_{(3)} \\ 14_{(10)} = 1 \cdot 8^1 + 6 \cdot 8^0 & \Rightarrow 16_{(8)} \\ 14_{(10)} = 14 \cdot 16^0 & \Rightarrow 14_{(16)} \equiv E_{(16)} \end{array}$$

Бройни системи

$$14_{(10)} = 1 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 0 \cdot 2^0 = 1110_{(2)}$$

Бройни системи

$$14_{(10)} = 1 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 0 \cdot 2^0 = 1110_{(2)}$$

База

Бройни системи

$$14_{(10)} = 1 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 0 \cdot 2^0 = 1110_{(2)}$$

Коефициенти

Бройни системи

$$14_{(10)} = 1 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 0 \cdot 2^0 = 1110_{(2)}$$

Позиции

Бройни системи

$$14_{10} = 1 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 0 \cdot 2^0 = 1110_{(2)}$$

База

Коефициенти

Позиции

Важно е и от коя бройна система идваме, т.е нейната база.

Бройни системи

Теорема

За всеки две естествени числа a и p , $p \geq 2$

Бройни системи

Теорема

За всеки две естествени числа a и r , $r \geq 2$ съществува единствено представяне на a

Бройни системи

Теорема

За всеки две естествени числа a и p , $p \geq 2$ съществува единствено представяне на a във вида

$$a = c_n p^n + c_{n-1} p^{n-1} + \dots + c_1 p^1 + c_0 p^0$$

при $0 \leq c_i < p$ и $c_n > 0$.

Бройни системи

Теорема

За всеки две естествени числа a и p , $p \geq 2$ съществува единствено представяне на a във вида

$$a = c_n p^n + c_{n-1} p^{n-1} + \dots + c_1 p^1 + c_0 p^0$$

при $0 \leq c_i < p$ и $c_n > 0$.

База

Бройни системи

Теорема

За всеки две естествени числа a и p , $p \geq 2$ съществува единствено представяне на a във вида

$$a = c_n p^n + c_{n-1} p^{n-1} + \dots + c_1 p^1 + c_0 p^0$$

при $0 \leq c_i < p$ и $c_n > 0$.

Коефициенти

Бройни системи

Теорема

За всеки две естествени числа a и p , $p \geq 2$ съществува единствено представяне на a във вида

$$a = c_n p^n + c_{n-1} p^{n-1} + \cdots + c_1 p^1 + c_0 p^0$$

при $0 \leq c_i < p$ и $c_n > 0$.

Позиции

Бройни системи

Теорема

За всеки две естествени числа a и p , $p \geq 2$ съществува единствено представяне на a във вида

$$a = c_n p^n + c_{n-1} p^{n-1} + \dots + c_1 p^1 + c_0 p^0$$

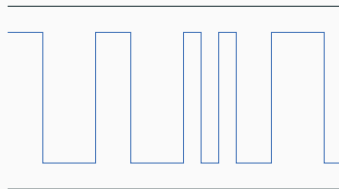
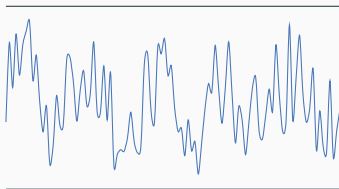
при $0 \leq c_i < p$ и $c_n > 0$.

База

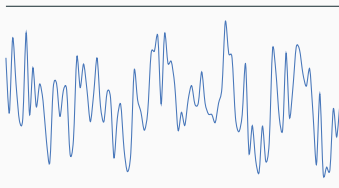
Коефициенти

Позиции

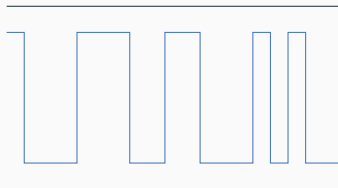
Какво са аналогов и цифров сигнал?



Какво са аналогов и цифров сигнал?

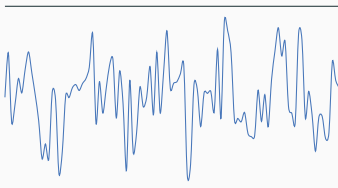


- Непрекъснат във времето;

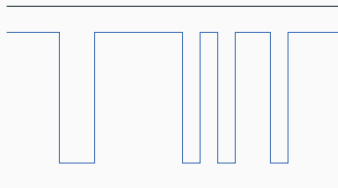


- Дискретизирани по време и ниво;

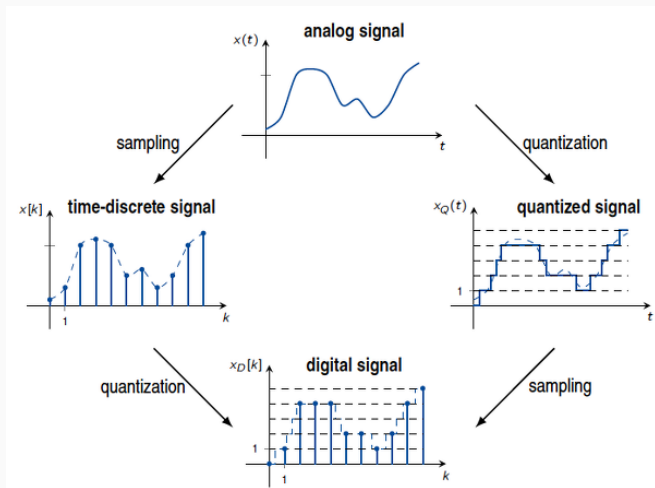
Какво са аналогов и цифров сигнал?



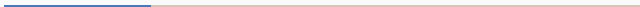
- Непрекъснат във времето;
- Носител на информация е *амплитудата*.



- Дискретизирани по време и ниво;
- Носител на информация е *последователността от битове*.



ЦАП



Операционен усилвател - подсещане

¹ $U_{id} := U_+ - U_-$; id идва от input difference

Операционен усилвател - подсещане

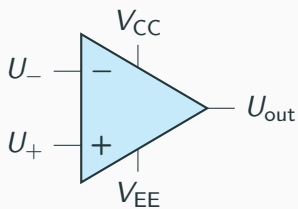
Определение

Аналогови интегрални схеми, най-често с два входа и един изход, чиито основни параметри се доближават до тези на идеален усилвател, т.е. безкрайно голямо усилване, безкрайно голямо входно съпротивление и нулево изходно. [Пан08]

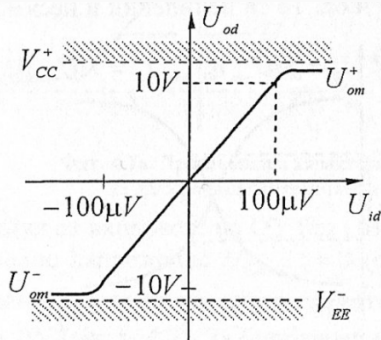
или

Подавайки U_{id}^1 на входа, получаваме $U_{id} \cdot A_d$ на изхода, където A_d е усилването и $A_d \rightarrow \infty$.

¹ $U_{id} := U_+ - U_-$; id идва от input difference



Символ за операционен усилвател.

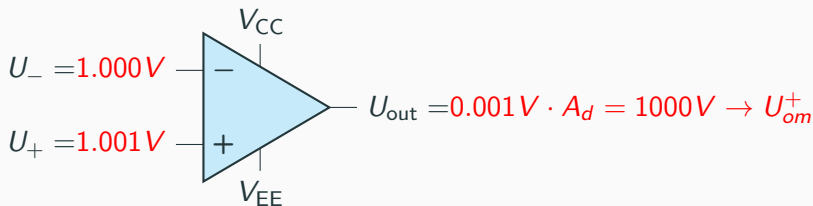


Усилване по напрежение

т.е

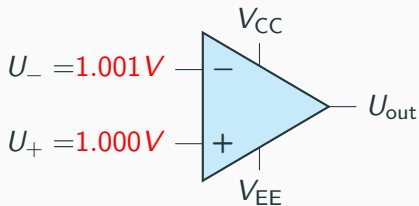
При свързване на *два отделни сигнала на входовете* дори при минимална разлика между потенциалите ОУ бързо достига насищане.

Пример с два входа



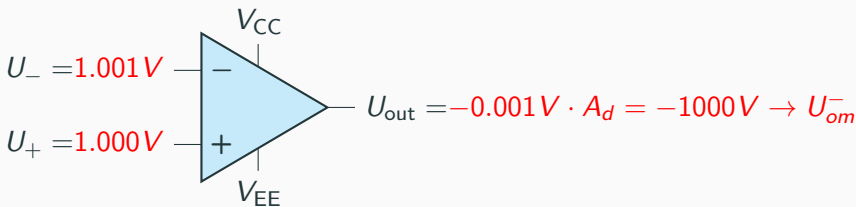
Пример при $A_d = 10^6$ и $U_{id} > 0$

Пример с два входа



Пример при $A_d = 10^6$ и $U_{id} < 0$

Пример с два входа

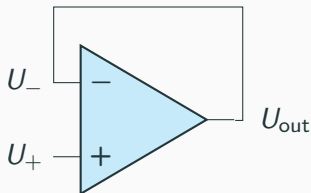


Пример при $A_d = 10^6$ и $U_{id} < 0$

Поради *гигантското* усиляване на разликата между входовете, се налага по някакъв начин *да го овладеем*, така че да бъде практически полезно. Това осъществяваме чрез *обратна връзка*.

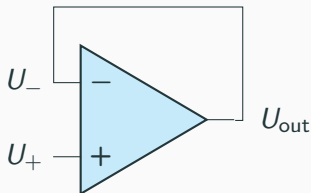
²Разбира се те се отнасят за идеалния случай, докато в действителност можем да ги приемем като приближение.

Поради *гигантското* усиляване на разликата между входовете, се налага по някакъв начин *да го овладеем*, така че да бъде практически полезно. Това осъществяваме чрез *обратна връзка*.



²Разбира се те се отнасят за идеалния случай, докато в действителност можем да ги приемем като приближение.

Поради *гигантското* усилване на разликата между входовете, се налага по някакъв начин *да го овладеем*, така че да бъде практически полезно. Това осъществяваме чрез *обратна връзка*.

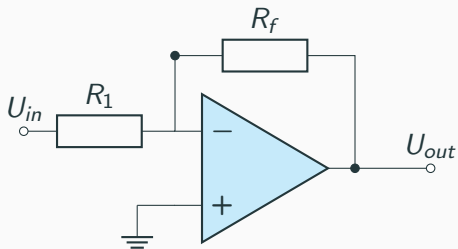


За да анализираме схемата, можем да използваме т.нар **златни правила** на ОУ²:

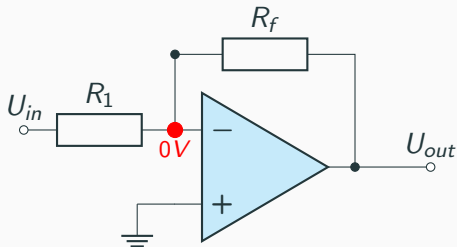
- При наличие на обратна връзка $U_+ = U_-$.
- През входовете на ОУ не протича ток.

²Разбира се те се отнасят за идеалния случай, докато в действителност можем да ги приемем като приближение.

Инвертирацц усилвател

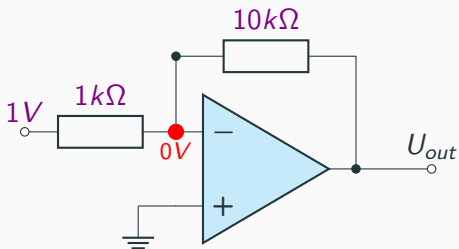


Инвертиращ усилвател

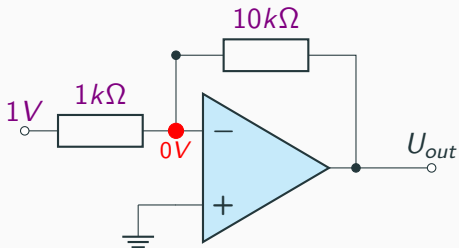


Посочената точка се нарича *условна земя*, тъй като посредством вече коментираните правила потенциалът на инвертиращия вход трябва се изравнява с този на неинвертиращия.

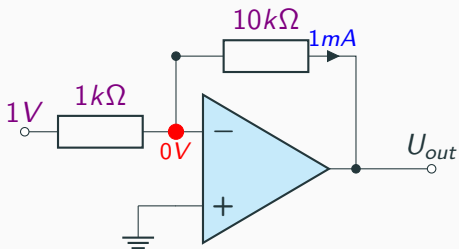
Да използваме примерни стойности, за да се улесним.



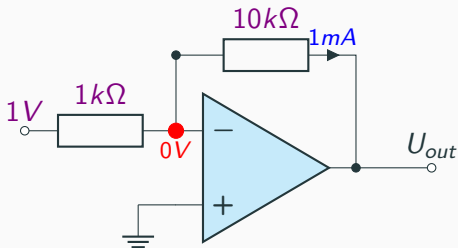
Да използваме примерни стойности, за да се улесним.



Откъде протича токът?

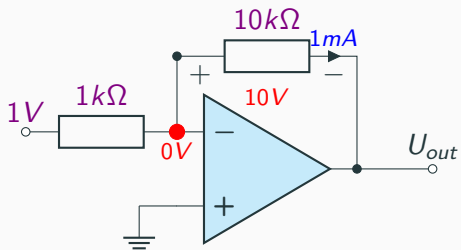


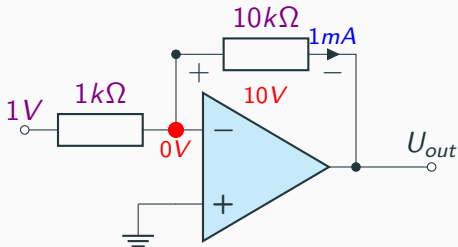
$$I = 1V \cdot 10^{-3}\Omega = 1mA$$



$$I = 1V \cdot 10^{-3}\Omega = 1mA$$

Тогава какъв е падът на напрежение върху “големия” резистор
- този, образуващ обратната връзка?





Щом потенциалната разлика между U_- и U_{out} е $10V$, докато положителният полюс има потенциал 0 , то остава $U_{out} = U_- - 10V = 0V - 10V = -10V$.

Инвертиращ усилвател

По този начин изведохме следния

Резултат

Подавайки 1V като входен сигнал, получаваме -10V на изхода.

или

Факт

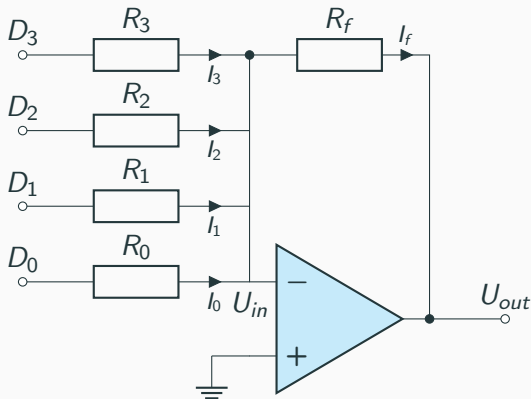
Ако имаме резистор на входа R_i и обратна връзка R_f , то усилването A_v отговаря на равенството

$$A_v = -\frac{R_f}{R_i}$$

и следователно при входен сигнал U_i следва

$$U_{out} = A_v \cdot U_i = -\frac{R_f}{R_i} \cdot U_i = -R_f \cdot \frac{U_i}{R_i}$$

Суматор на напряжения



Суматор на напрежения

$$I_1 + \dots + I_n = I_f$$

Суматор на напряжения

$$I_1 + \dots + I_n = I_f$$

$$\frac{U_1}{R_1} + \dots + \frac{U_n}{R_n} = I_f$$

Суматор на напряжения

$$I_1 + \dots + I_n = I_f$$

$$\frac{U_1}{R_1} + \dots + \frac{U_n}{R_n} = I_f$$

$$U_{out} = -R_f \cdot \frac{U_i}{R_i} = -R_f \cdot I_i = -R_f \cdot I_f$$

Суматор на напряжения

$$I_1 + \dots + I_n = I_f$$

$$\frac{U_1}{R_1} + \dots + \frac{U_n}{R_n} = I_f$$

$$U_{out} = -R_f \cdot \frac{U_i}{R_i} = -R_f \cdot I_i = -R_f \cdot I_f$$

$$U_{out} = -R_f \cdot I_f = -R_f \cdot \left(\frac{U_1}{R_1} + \dots + \frac{U_n}{R_n} \right)$$

Суматор на напрежения

$$I_1 + \dots + I_n = I_f$$

$$\frac{U_1}{R_1} + \dots + \frac{U_n}{R_n} = I_f$$

$$U_{out} = -R_f \cdot \frac{U_i}{R_i} = -R_f \cdot I_i = -R_f \cdot I_f$$

$$U_{out} = -R_f \cdot I_f = -R_f \cdot \left(\frac{U_1}{R_1} + \dots + \frac{U_n}{R_n} \right)$$

Какво ще се получи, ако всички съпротивления са равни?

Суматор на напрежения

$$I_1 + \dots + I_n = I_f$$

$$\frac{U_1}{R_1} + \dots + \frac{U_n}{R_n} = I_f$$

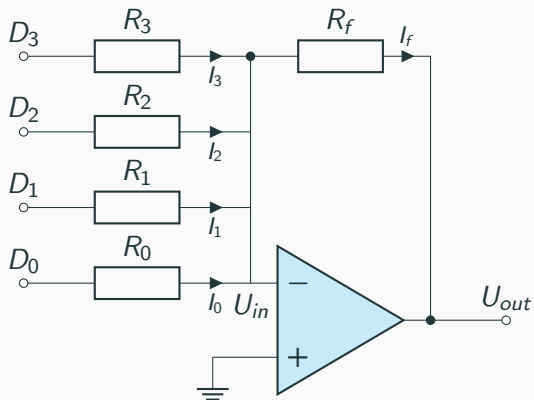
$$U_{out} = -R_f \cdot \frac{U_i}{R_i} = -R_f \cdot I_i = -R_f \cdot I_f$$

$$U_{out} = -R_f \cdot I_f = -R_f \cdot \left(\frac{U_1}{R_1} + \dots + \frac{U_n}{R_n} \right)$$

Какво ще се получи, ако всички съпротивления са равни?

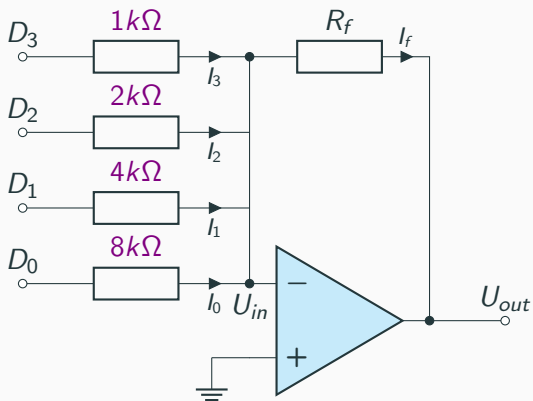
$$U_{out} = -(U_1 + \dots + U_n)$$

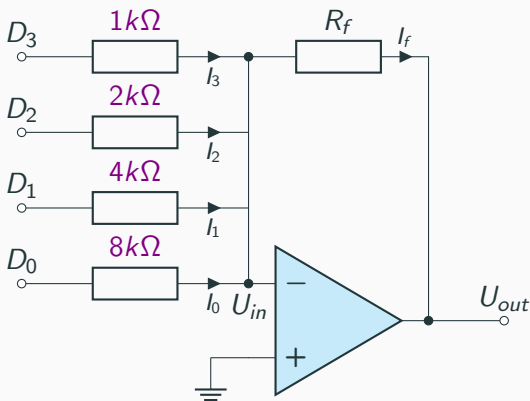
R-DAC



R-DAC

- Припомняйки си, че $D0$ се явява LSB, а $D3$ - MSB, то се досещаме, че трябва да вземе “повече” от $D3$, отколкото от $D0$.
- Колко пъти повече?





Резултатът е, че *мащабът*, с който сумираме всяко едно от входните напрежения е съответно $1, \frac{1}{2}, \frac{1}{4}, \frac{1}{8}$.

R-DAC

Пример

Да преобразуваме 0101 и 1011, ако логическата единица е 5V.

R-DAC

Пример

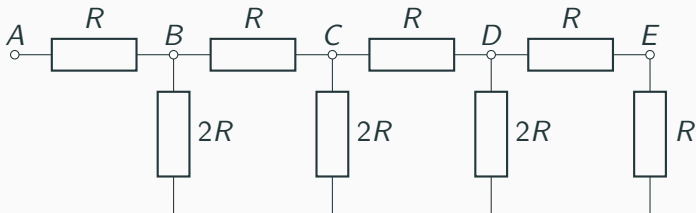
Да преобразуваме 0101 и 1011, ако логическата единица е 5V.

- + много прост
- гигантски стойности за резисторите
- доста шумове

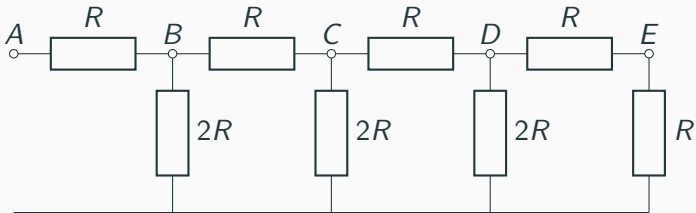
R-2R

- Основният проблем, който се прицелваме да решим е да премахнем нарастването на размерите на резисторите.
- Осъществяваме решение, основаващо се на идеята за *стълба от резистори*.

R-2R

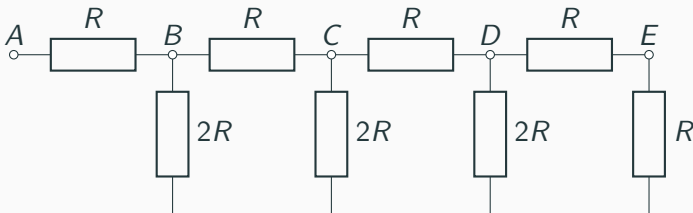


R-2R



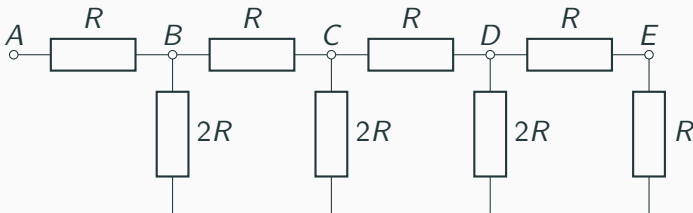
Какво е напрежението в E ?

R-2R



Какво е напрежението в E ? Това е делител на напрежение - $\frac{1}{2}D$.
Какво е напрежението в D ?

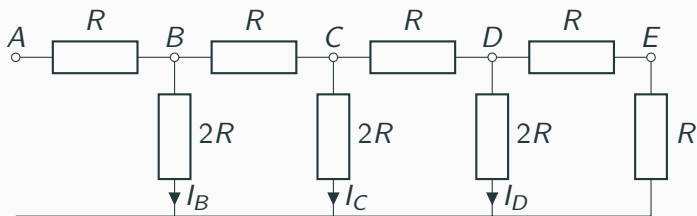
R-2R



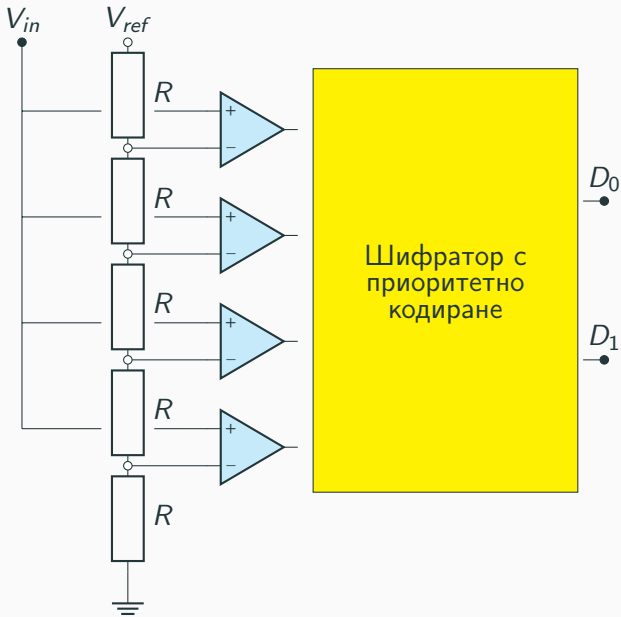
Какво е напрежението в E ? Това е делител на напрежение - $\frac{1}{2}D$.
Какво е напрежението в D ? Това отново е делител, но този път спрямо C . Резисторът между C и D е свързан последователно с останалите три “вдясно”, които са еквиваленти на R :

$$\frac{1}{R_E} = \frac{1}{2R} + \frac{1}{R + R} \implies R_E = R$$

R-2R



АЦП



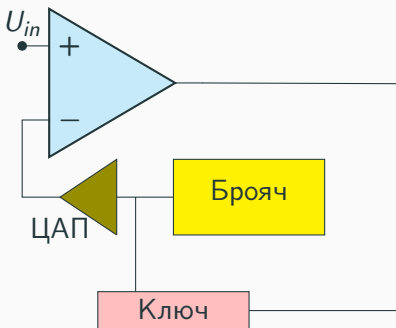
Flash

+ много бърз

- много компаратори; 2^n
при n бита

Другият подход, който ще разгледаме, е от една страна аналогичен, но вместо сравненията да са едновременно, те се случват едно след друго.

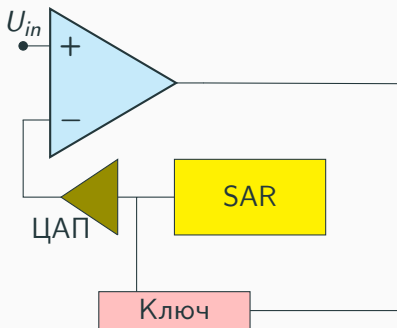
Чрез приближение³



Този подход обаче е забележително **бавен**. Можем да оптимизираме доста лесно.

³от англ. step counter/successive approximation

Чрез приближение ⁴



Тук използваме *successive approximation register*, чрез който прилагаме двоично търсене.

⁴от англ. step counter/successive approximation

Литература

- ***"Op Amps: Digital to Analog Conversion"***. URL:
<https://youtu.be/n2aC9hWKYig?si=CTGKSN5FVrkMmIEq>
(дата на посещ. 28.09.2023)
- ***"Op Amps: Analog to Digital Conversion"***. URL:
<https://youtu.be/2uXP9J-1Dhs?si=neu9tLI80UfHKrkC>
(дата на посещ. 28.09.2023)
- Стаменов Димитър Пандиев Ивайло Донева Лила.
Аналогова схемотехника - I. 2008
- ***"OpAmps Tutorial - What is an Operational Amplifier?"***.
2014. URL:
<https://youtu.be/7FYHt5XviKc?si=mZoM9-4rgL8NSD5K>
(дата на посещ. 24.09.2023)

- ***"How Do DACs Work? - The Learning Circuit"***. 4 авг.

2023. URL:

https://youtu.be/YAxrmoVtEtE?si=1MRV_z5UDheiA4h8

(дата на посещ. 24.09.2023)

- ***"How Do DACs Work? - The Learning Circuit"***. 4 авг.

2023. URL:

https://youtu.be/YAxrmoVtEtE?si=1MRV_z5UDheiA4h8

(дата на посещ. 24.09.2023)

- ***"Making a 12 Bit DAC Using an Arduino - the Learning Circuit."*** 21 авг. 2023. URL:

<https://youtu.be/IDrWtgTb3D4?si=DcQKbd0YaAnw1t3r>

(дата на посещ. 24.09.2023)

- "James M. Fiore". ***"Operational Amplifiers & Linear Integrated Circuits: Theory and Application"***. 2022. URL: https://www2.mvcc.edu//users/faculty/jfiore/books/OperationalAmplifiersAndLinearICs_3E.pdf (дата на посещ. 28.09.2023)



That's all Folks!